

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Simo Purho

SÄHKÖVERKKOJEN KEHITYS JA TULEVAISUUS

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2018
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
013 260 6800

Tekijä
Simo Purho

Nimeke
Sähköverkkojen kehitys ja tulevaisuus

Toimeksiantaja
Insplan Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Suomen sähköverkkojen nykytilaa ja niiden kehitystä tulevaisuudessa. Työssä keskitytään lähinnä pien- ja keskijänniteverkkoihin ja niiden erilaisiin osiin. Suomen sähköverkosto alkaa olla teknisen käyttöikänsä päässä ja sitä on uudistettava. Jakeluverkkoyhtiöiden on jatkuvasti pyrittävä parantamaan sähkönjakelun katkeamattomuutta sekä kehitettävä verkostojaan.

Jakeluverkkoa on uusittu paljon ja ilmajohtoja on saneerattu maakaapeliksi. Muuntamoiden ja kotikeskusten automatiikka sekä älylaitteisto ovat lisääntyneet paljon viime vuosina. Aluksi työssä käsitellään sähköverkkoston tämän hetkistä tilannetta, mitä komponentteja on käytössä ja mitkä komponentit yleistyvät jatkuvasti. Myöhemmin perehdytään uusiin tekniikkoihin sekä verkon osiin, kuten mikroverkkoihin ja kysyntäjoustoon.

Uusiutuvan energian lisääntyessä verkolta vaaditaan enemmän säätövoimaa, jonka puutetta pyritään korjaamaan automaatiolla. Nykyisten järjestelmien rinnalle on mahdollista tuoda hyvin toimivia älyverkkoratkaisuja, kuten mikroverkkoja. Sähköjärjestelmän osat kehittyvät nopeasti ja siksi sen on oltava helposti muunneltavissa. Tulevaisuuden sähköverkkoston tärkein tehtävä on liittää yhteen useita erilaisia järjestelmiä ja toimia moneen suuntaan.

Kieli
suomi

Sivuja 31

Asiasanat
Älyverkko, jakeluverkko, kehitys



THESIS
May 2018
Degree Programme in Electrical Engineering
Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
FINLAND
013 260 6800

Author
Simo Purho

Title
Development and future of Finland's power grid

Commissioned by
Insplan Oy

Abstract

The purpose of the thesis was to study the present state and future development of Finland's power grid. The main focus of thesis is on low and medium voltage distribution networks and their different parts. The distribution network in Finland is approaching the end of its technical life and it needs to be updated. Electricity companies have to continuously improve the reliability of the distribution of electricity and also develop their electricity systems.

There have been massive investments in the distribution network and overhead lines have been replaced by cables. Use of automation and smart components has increased in transformers and switchboards nowadays. At first, this thesis deals with the current condition of the existing power grid and also with what kind of components are used now and which ones will become more common. Later, the thesis introduces new technologies, and parts of grids such as micro grids and how to handle peak loads with automation.

When generation of electricity with renewable energy increases, the grid needs more power characteristic, the lack of which has been replaced with automation solutions. It is possible to bring new kinds of smart grid systems like micro grids to the side of the old electrical power system. The parts of a power grid develop fast and that is why it has to be an easily modified system. The most important task of the future power grid is to connect different kinds of systems, and also work in many directions.

Language

Finnish

Pages 31

Keywords

smart grid, distribution grid, development

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Insplan Oy	7
3	Sähköverkko Suomessa	8
3.1	Kantaverkko	8
3.2	Jakeluverkko	9
3.3	Sähköasema	11
3.4	Jakelumuuntamot	11
3.5	Automatiikka sähköverkossa	12
3.6	Komponentit	12
3.7	Datan keräys	13
4	Älykäs verkko (Smart grid)	14
4.1	Verkostoautomatiikka	15
4.2	Kysyntäjousto	15
5	Mikroverkot	18
6	LVDC ja HVDC-verkot	21
6.1	Pienjännitteinen tasasähkö LVDC	21
6.2	Suurjännitteiset tasavirtayhteydet (HVDC-yhteydet)	22
6.2.1	Verkkokommutoitu tasasähköyhteys	23
6.2.2	Itsekommutoitava tasasähköyhteys	24
7	EU-superverkko	26
8	Pohdinta	28
	Lähteet	30

Käsitteet ja sanasto

AC	Vaihtovirta
AMR	Automaattinen mittarinluenta
CHP	Combined Heat and Power – sähkön ja lämmön yhteis tuotto
DC	Tasavirta
EHV	Extra High Voltage - Suurjännite
HVDC	High voltage direct current – suurjännitteinen tasasähkö
KJ	Keskijännite (>1000V AC<45kV AC)
LCC	Line commutated converter – verkkokommutoitu tasasähkö
LVDC	Low voltage direct current - pienjännitteinen tasasähkö
Mikroverkot	Pienjännitteinen yhteisö, joka tuottaa ja jakaa energiaa
PJ	Pienjännite (<1000V AC, <1500V DC)
SJ	Suurjännite (>45kV AC)
Super verkko	Euroopan laajuinen kantaverkko
Virtuaalinen voimalaitos	Yhteenliittymiä, jotka kykenevät tarjoamaan energiaa ja järjestelmäpalveluita vapaille markkinoille
Älyverkko	Automatisoitu, itsenäiseen toimintaan pystyvä sähkönjakelujärjestelmä [15.]

1 Johdanto

2010-luvulla jakeluverkoille poikkeuksellisen suuret vahingot aiheuttaneet myrskyt ja sähkömarkkinalain uudistus ovat vaikuttaneet siihen, että sähköverkkoyhtiöiden on parannettava sähkönjakelun toimintavarmuutta. Nykyinen jakeluverkko on suurimmaksi osaksi rakennettu 1970–1980-luvulla ja se alkaa olemaan teknisen käyttöikänsä päässä. Tästä syystä ilmajohtoja saneerataan maakaapeleiksi ja sähköverkostoa kehitetään entistä älykkäämmäksi lisäämällä verkostoautomaatiota. [1.]

Tässä opinnäytetyössä perehdytään Suomen sähköverkkojen nykytilaan ja niiden kehitykseen tulevaisuudessa. Työn alussa esitellään Suomen sähköverkon nykytilaa ja muutoksia, joita tapahtuu parhaillaan. Pääpaino on älykkään verkon kehityksessä ja sen erilaisissa osissa. Työssä käsitellään myös mikro- ja superverkkoja sekä tasasähköverkon mahdollisuuksia nykyisen järjestelmän rinnalla. Työn lähtökohtana oli saada selkeä käsitys Suomen nykyisen sähköverkon tilasta sekä siitä miten se tulee kehittymään.

2 Insplan Oy

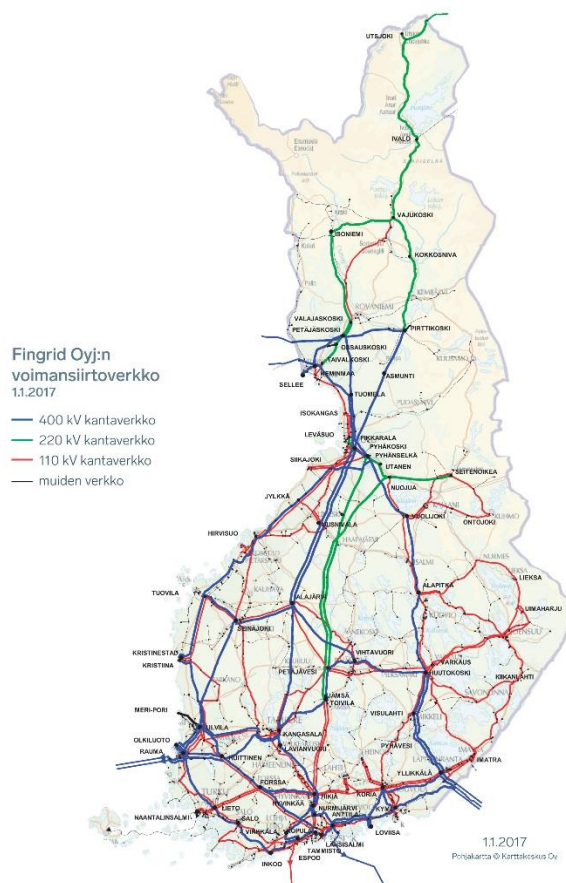
Työn toimeksiantajana toimi Insplan Oy, joka on vuonna 2015 perustettu infrastruktuuri- ja energia-alan projektinjohtotalo. Insplan Oy toteuttaa sähkö-, tietoliikenne- ja valaistusverkkojen suunnittelupalveluita, sähköverkkojen lentotarkastuksia ja projektinhallintaa. Insplan Oy työllistää tällä hetkellä yli 20 sähköalan ammattilaista. Yritys toimii maanlaajuisesti neljässä eri toimipisteessä: Porvoossa, Imatralla, Seinäjoella ja Joensuussa. [2.]

Uusiutuvan energian, sähköautojen sekä kiristyvän päästöpolitiikan myötä Suomessa eletään murrosta, joka vaikuttaa niin sähkön tuotantoon, siirtoon kuin kulutukseenkin. Jakeluverkko uudistuu ja saa osakseen älylaitteistoa. Myös kotitaloudet tuottavat omaa energiaansa. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää työnantajalle ja sähköverkon suunnittelijoille sähköverkoston sekä sen osien kehitystä lähitulevaisuudessa. Työnantaja pystyy kartoittamaan tulevaisuuden vaikutuksia nykyiseen suunnitteluun ja mahdollisesti myös huomioimaan sen työntekijöiden koulutuksessa ja yrityksen toiminnassa.

3 Sähköverkko Suomessa

3.1 Kantaverkko

Suomen sähköverkko voidaan jakaa kahteen pääosaan: siirto- sekä jakeluverkkoon. Verkkojen jako tapahtuu käytännössä jännitteen suuruuden mukaan. Siirtoverkkoon kuuluu 400 kV:n, 220kV:n ja 110 kV:n suurjännitteiset voimansiirtoverkon osat, jotka muodostavat yhdessä kantaverkon (kuva 1). Kantaverkon tarkoituksena on jakaa sähköä maan jokaiseen osaan ja lisäksi myös Pohjoismaihin, Viroon ja Venäjälle. Ulkomailta siirretään sähköä myös Suomen käyttöön. [3.]



Kuva 1. Fingrid Oyj:n kantaverkko. [4.]

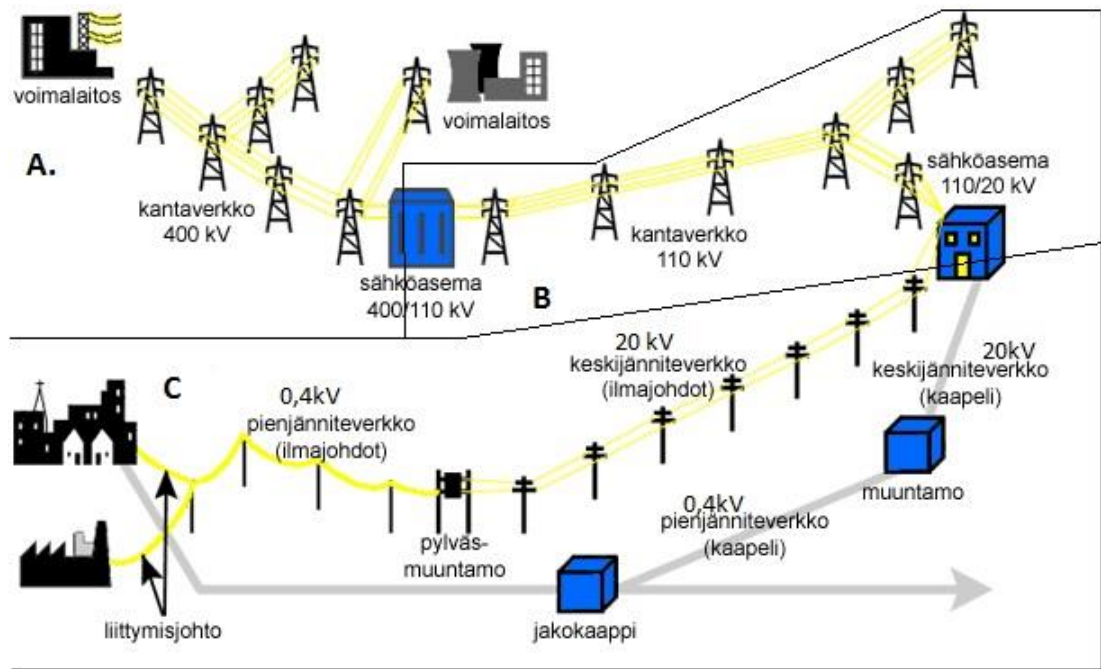
Kantaverkko toimii nimensä mukaisesti sähköverkoston pääkantana johon ovat liittynyt muun muassa isot sähköntuotantolaitokset ja jakeluverkot. Kantaverkossa siirtomatkat ovat pitkiä, joten siirtohäviöiden minimoimiseksi käytetään suuria jännitteitä. Kantaverkko on malliltaan suljettu silmukaverkko. Kantaverkon omistaa Fingrid Oyj, joka on vastuussa verkon toiminnasta ja kehittämisestä.

3.2 Jakeluverkko

Jakeluverkkoon kuuluvat kantaverkkoon kuulumattomat suurjännitteiset 110 kV:n johdot sekä keski- ja pienjänniteverkot. Keskijänniteverkon jännitteen suuruus vaihtelee 1:n ja 20 kV:n välillä ja pienjänniteverkon jännite on 0,4 kV. Jakeluverkot toimivat alueittain esimerkiksi maakunnan alueella. [3.]

Keskijänniteverkko rakennetaan suurimmalta osaltaan silmukoiduksi ja pienjänniteverkko taas säteittäiseksi. Vaikka KJ-verkko onkin rakennettu silmukoiduksi, sitä käytetään avoimena verkkona. Verkon toimintaa ohjataan erottimilla ja näin käyttövarmuus on parempi vikatilanteissa. Silmukoidussa verkossa syöttö on siis varmistettu. Sähkökatkoa ei synny, vaikka yksi erotinväli vikaantuisikin, toisin kuin säteittäisessä verkossa. [7, 13.]

Kanta- ja jakeluverkon yhdistyminen tapahtuu sähköasemalla (kuva 2: kohdat A ja B), jossa erijännitteiset verkot yhdistyvät. Sähköasemalla verkon jännitettä muutetaan kuluttajan käyttöön sopivaksi. Asemalta sähköä voidaan jakaa esimerkiksi 110 kV:n jännitteellä raskaalle teollisuudelle (kuva 2. B). Sähköä jaetaan edelleen sähköaseman kautta 20 kV:n keskijännitteellä pienteollisuudelle sekä lähemmäs asuinalueita. Jakelumuuntajat muuntavat sähkön pienjännitteeksi ja siten normaalien kuluttajien käytettäväksi (kuva 2. C). [3.]



Kuva 2. Yksinkertaistettu sähköverkon rakenne. A: kantaverkko, B: kanta- tai jakeluverkkoa ja C: keski- ja pienjännitejakeluverkot. [6.]

Jakeluverkosta jaetaan sähköä kuluttajalle, joten jännite on muunnettava kuluttajalle sopivaksi pienjännitteeksi. Muuntaminen tapahtuu jakelumuuntajassa, joka voi sijaita esimerkiksi kerrostalon sähkötilassa tai olla tyypiltään pylväs- tai puistomuuntamo. [3.]

Jakeluverkot ovat ns. jakeluverkkoyhtiöiden hallinnoimia verkkoja, joilla sähköä jaetaan alueellisesti, esimerkiksi Pohjois-Karjalassa toimii PKS Oy. Nykyisen sähkömarkkinalain vuoksi yhtiöt ovat alkaneet investoimaan maakaapelointiin. Vuonna 2013 voimaan astunut sähkömarkkinalaki velvoittaa yhtiöitä parantamaan sähköjakeluvarmuuttaan huomattavasti. Siirtymäajan jälkeen haja-asutusalueilla ei saa esiintyä yli 36 tunnin, eikä taajamissa yli kuuden tunnin sähkökatkoja. [5.]

3.3 Sähköasema

Sähköasemat ovat verkon solmukohtia, joissa voidaan keskittää ja jakaa energiaa, tai muuntaa jännitettä. Lisäksi siellä sijaitsee verkon suojalaitteita, automaatiota ja kytkinlaitteistoa. Sähköaseman tärkeimpiä osia ovat pää- ja mittamuuntajat sekä kytkinlaitteisto. Sähköasemaa voidaan pitää yhtenä sähkönjakeluverkon tärkeimpänä osana, sillä se toimii verkon jakelukeskuksena ja määrittää myös muun verkon mitoituksen. Haja-asutusalueilla sähköasemat ovat usein ilmaeristeisiä kytkinlaitoksia ja taajamassa SF₆-eristeisiä laitoksia lähinnä ulkonäöllisistä syistä. [7, 119.]

3.4 Jakelumuuntamot

Jakelumuuntamot ovat PJ-verkkoa syöttäviä muuntamoita, jotka muuntavat 20 kV:n jännitteen 0,4 kV:n pienjännitteeksi. Nykyisin maakaapeloinnin yhteydessä käytetään puistomuuntamomallista ratkaisua (kuva 3).



Kuva 3. KL Industrin Elit-sarjan puistomuuntamo. [8.]

Muuntamo sisältää KJ-kiskoston, muuntajan, PJ-lähdöt ja mahdollisen apujärjestelmän. Myös verkon suojaus toteutetaan muuntamossa. Nykyisen maakaapeloinnin myötä käytössä on niin sanottu satelliittimuuntamo, jota syötetään säteil-täin. Muuntamo on pieni ja yksinkertainen, ja sen kytkinlaite on sitä syöttävällä, isommalla muuntamolla. Tällä yksinkertaisella muuntamolla saavutetaan etu haja-asutusalueilla, joissa kuormitukset kasvavat. [7, 158.]

3.5 Automatiikka sähköverkossa

Verkoston automatisoinnilla pyritään parantamaan sähkönjakelun varmuutta ja samalla pienentämään kunnossapidon kustannuksia. Uudet muuntamot ovat usein kaukokäyttöisiä ja niitä voidaan ohjata suoraan valvomoista käsin, eikä esi-merkiksi vioittunutta verkon osaa tarvitse erottaa muusta verkosta muuntamolta. [9.]

Automatiikan avulla pystytään seuraamaan tarkasti sähkön laatua, verkon kuor-mitusta, virtoja sekä jännitteitä. Tarpeen vaatiessa voidaan säätää verkon erilai-sia osa-alueita, jotta sähkönlaatu pysyy standardin sallimassa rajassa. Liiallinen sähkönkulutus verkossa nostaa loistehon määrää ja pudottaa jännitettä. Liian vä-häinen käyttö nostaa jännitettä ja laskee loistehoa. Sähkönlaadun standardi SFS-EN 50160:n mukaan esimerkiksi jännitteen on oltava 95 % mitatuista arvoista vä-lillä 230V +-10%. [11.]

3.6 Komponentit

Sähköverkkoa ohjataan ja valvotaan valvomoista käsin. Yleisempiä ohjauksia ovat etäohjattavat erottimet, joilla voidaan esimerkiksi sähkökatkoksen yhteydessä kytkeä vioittunut osa irti muusta verkosta. Nykyään on käytettävissä myös automaattisia erottimia, jotka kytkevät verkonosan irti maasulun yhteydessä ja myös sulkevat erottimet. Jos vika jatkuu muutaman sulkemisen ja avaamisen jäl-keen, ilmoittaa automatiikka valvomoon viasta. [9.]

Sähköverkkoa suojataan myös erilaisilla suojalaitteilla ja hälytyksillä, kuten KJ-verkkoa releillä ja PJ-verkkoa varokkeilla. Sähköasemilla on myös käytössä muuntajan jännitteen säätö, erottimien etäohjaus, suojareleistys sekä erilaiset mittaukset, joita voidaan seurata valvomosta. [9.]

3.7 Datan keräys

Yleisin automatisoidun sähköverkon osa on etäluettava sähkömittari. Sähkömittarin pääasiallinen tehtävä on seurata tunnin tarkkuudella asiakkaan energian kulutusta. Nykyisin voidaan puhua, että lähes jokaisessa kotitaloudessa on etäluettava mittari. Vuoden 2009 valtioneuvoston päätöksen jälkeen vaihdettiin vanhat mekaaniset mittarit uusiin etäluettaviin. [7, 258;10.]

Mittarin keräämän datan avulla verkkoyhtiö saa muutakin tietoja kuin pelkän energiankulutuksen. Etäluettavalla mittarilla seurataan myös muun muassa jännitteen laatua, käyttökatkoja ja niillä voidaan myös toteuttaa kuormanohjauksia. Kuluttajalle AMR-tekniikasta on tällä hetkellä hyötyä lähinnä laskutuksen ja oman kulutuksen seurannan tarkkuudessa. Kuluttaja pystyy esimerkiksi mobiilisovelluksen avulla tarkkailemaan sähkönkulutustaan sekä tuntihintoja. Näin ollen on helpompaa säästää ja säädellä energiankulutusta. Lisääntyneet kotiautomaation ohjaukset, esimerkiksi etäohjattava lämmitysjärjestelmä yhdessä tarkan sähkönkulutuksen ja hintatason seurannan kanssa, luovat kuluttajalle tosiasialliset mahdollisuudet tehostaa omaa kulutustaan. [7, 258;10.]

Kulutuksen seurannan merkitys tulee korostumaan tulevaisuudessa, kun sähkön tuotannon joustavuus pienenee muun muassa uusiutuvan energian takia. Nykypäivänä käytössä on niin sanottu yö- ja päivä sähkö, jolla suurempaa sähkön kulutusta pyritään ohjaamaan yöajalle, jolloin verkon muu kuormitus on pienempää. Tätä kutsutaan kysyntäjoustoksi. Tulevaisuudessa kysyntäjoustopienentymisen tärkeys korostuu ja se tulee muuttumaan jatkuvaksi kulutuksen ja tuoton seurannaksi. Asiakkaalle verkon joustavuuden pienentyminen tulee näkymään erilaisina hintatasoina. [12.]

4 Älykäs verkko (Smart grid)

Älyverkko eli Smart grid on laaja sähköjärjestelmä niin jakelu- kuin siirtoverkon puolella. Se käyttää hyödykseen erilaisia automaatiolaitteita ja ohjelmistoja. Se on myös kykenevä toimimaan pitkälti itsenäisesti. Älyverkko koostuu erilaisista verkon osista, esimerkiksi mikroverkoista, virtuaalisista voimalaitoksista ja tehosoluista. Älyverkko eroaa nykyisistä jakelu- ja siirtoverkoista huomattavasti, sillä sen tarkoituksena on mahdollistaa erilaisten käyttäjien liittyminen yhteen, eikä niinkään olla vain yhteen suuntaan syöttävä järjestelmä. [13;15, 508.]



Kuva 4. 3M:n näkemys tulevaisuuden älykkäästä verkosta. [14.]

Kuvassa 4 on esitetty pelkistettynä tulevaisuuden älyverkko. Kuvassa on esitetty keskellä ICT-keskukset tiedonsiirtoa ja kommunikointia varten. Kuvassa on myös erilaisia sähköntuotantojärjestelmiä: tuuli-, aurinko- ja vesivoimalat sekä kotitalousyhteisöjen luomat mikroverkot. Mikroverkkojen energiavarastoina toimivat akustot ja sähköautot. [14.]

Tarve älyverkon kaltaiselle järjestelmälle on syntynyt päästöleikkausten ja ilmastopöimusten myötä. Uusiutuvan energian tuotannon lisääntyessä sähköverkon

säädettävyys kärsii. Tarvitaan yhä enenevässä määrin energialle varastointipaikkoja sekä tarkkaa kulutuksen ja tuoton seurantaa. Myös erilaiset pientuotannot tarvitsevat nykyistä paremmat liitäntämahdollisuudet verkkoon.

4.1 Verkostoautomaatiikka

Pohjan toimivalle älyverkolle luovat useat erilaiset automaatiolaitteet, jotka yhdessä mahdollistavat verkon kokonaisoptimoinnin. Komponenttien on oltava helpposti muunneltavissa ja yhdistettävissä toisiinsa niin tietoliikenteen kuin sähköisten ominaisuuksienkin puolesta. Teknologian nopean kehityksen ja verkkojen pitkän iän vuoksi on kiinnitettävä erityistä huomiota verkon muunneltavuuteen ja päivitettävyyteen. [16.]

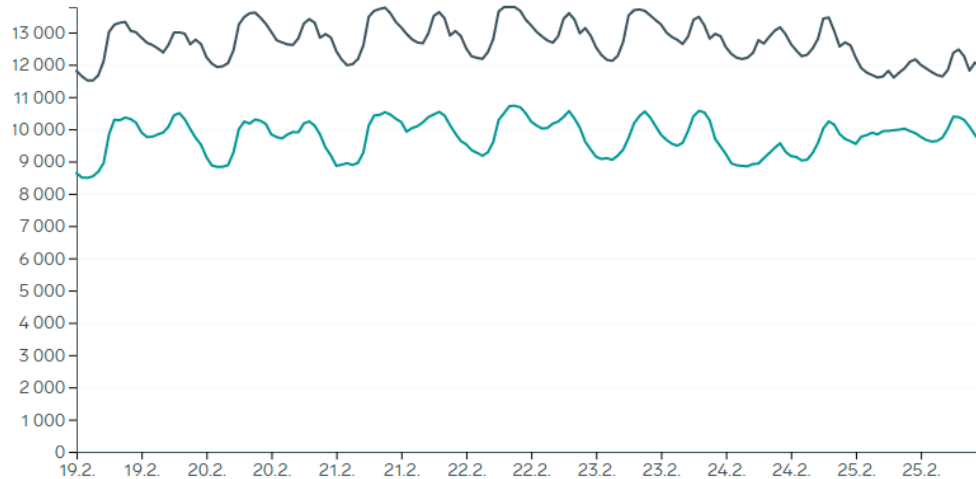
Suomen sähköverkkoyhtiöt ovat ottaneet viime vuosina käyttöönsä verkonparanushankkeissaan älymuuntamoita perinteisten muuntamoiden rinnalle. Älymuuntamot sisältävät usein joko erotin- tai katkaisijalaitteiston, vianpaikannuksen, mitauslaitteistoa, reaaliaikaisen etäohjauksen sekä datan seurannan. Erityisesti vianpaikannus, automaattinen erotus ja jälleenkytkentä lyhentävät jakeluhäiriöiden kestoa. Älymuuntamot toimivat verkon solmukohtina ja yhdistävät ilmajohdon sekä maakaapelin. Älylaitteistolla pystytään erottamaan vikaantumisherkempi ilmalinja ja näin varmistamaan kaapeloidulle verkolle sähkönsyöttö. Automaattinen takaisinkytkentä mahdollistaa verkon nopean takaisinkytkennän tilanteissa, joissa hetkellinen maasulku on saanut verkon suojalaitteet toimimaan. [16.]

4.2 Kysyntäjousto

Kysyntäjoustolla tarkoitetaan kulutuksen siirtämistä huippukuormituksen ajalta pois. Nykyiset sähkömarkkinat toimivat kysynnän ja tarjonnan periaatteen mukaisesti. Hinta määräytyy siis ostohetken sähköntuotannon ja kulutuksen määrästä. Mikäli tuottoa on paljon ja kulutusta vähän, on hinta pienempi.

Uusiutuva sähköjärjestelmä ei ole enää niin joustava kuin on tähän mennessä totuttu. Uusiutuvan energian tuotantolaitokset ja ydinvoimalat eivät voi säätää

sähköntuotantoon. Ne tuottavat silloin kuin tuulee ja aurinko paistaa, sekä ydinvoimalat käyvät tasaisesti läpi vuoden. Tämä aiheuttaa entistä voimakkaampia hinnan vaihteluita sähkömarkkinoilla. [17.]



Kuva 5. Suomen sähköntuotanto ja -kulutus MWh/h väliltä 19.–25.2.2018. [18.]

Kysyntäjoustop avulla yksittäinen kuluttaja voi säästää kuluissaan ja osaltaan vähentää sähköverkon kuormitusta. Kuvassa 5 huomataan, kuinka tuotanto (turkoosi) ja kulutus (musta) seuraavat toisiaan. Kysyntäjoustop avulla voidaan tasoitaa kulutuksen huippukuormia, jotka sijoittuvat aamu- ja iltatunneille. [17.]

Kodin älylaitteet ovat 2010-luvulla yleistyneet ja lähes jokaista uutta laitetta voi ohjata etäkäyttönä. Automaatiikan ja AMR:n avulla voidaan seurata hetkellistä markkinahintaa. Hinnan noustessa voidaan esimerkiksi sähköauton latausta siirtää myöhemmäksi tai kodin lämmitysjärjestelmän tehoa pienentää. Tämä vaatii kuitenkin uudiskohteissa releistyksiä ja väyläverkoston luomista. Saneerauskohteissa lämmitysjärjestelmiin on mahdollista lisätä jälkikäteen etäohjauksen mahdollistavat komponentit. Etäohjaus voidaan toteuttaa esimerkiksi Wifi-yhteyden avulla, jolloin pystytään seuraamaan kulutusta ja lämpötiloja mobiilisovelluksen välityksellä. [17.]

Älyverkoilla pyritään helpottamaan ennen kaikkea sähköjärjestelmän kuormitusta kulutuksen huippuhetkinä. Suomessa verkon säätäminen tapahtuu pääasiassa

vesivoimaloiden avulla. Vesivoimaloiden sähköntuottoa on helppo säätää veden juoksutuksen määrällä. Laki asettaa myös rajoituksia ohijuoksutusten sekä jokien minimivirtausten määrälle. Säättövoimana käytetään myös ulkomailta ostettua sähköä. Suomen päivittäinen säätötehon tarve arvioidaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä. Kysyntäjoustop avulla pystytään vähentämään huippukuormitustilanteita, kun automaation määrä kotitalouksissa ja pienyrityksissä kasvaa. On huomattava, että säädön tarve tulee jatkuvasti kasvamaan Suomessa. Luotettava ja laadukas sähkönjakelu on perusedellytyksiä Suomessa. Jotta se onnistuu lisääntyvien uusiutuvien energioiden tuotantolaitosten kanssa, on säättövoiman tarve varmistettava. Erityisesti häiriötilanteissa tai huonon tuotannon aikana, säättövoiman tarve voi olla melko suuri tulevaisuudessa. Säättövoimaa voidaan ostaa naapurivaltioilta, mutta olisi myös tärkeää kehittää omavaraisuutta. EU:n yhteinen äly- ja kantaverkkoratkaisu voi toteutuessaan luoda uusia markkinoita myös Suomeen, mikä osaltaan laajentaa ostosähkön saatavuutta. [19.]

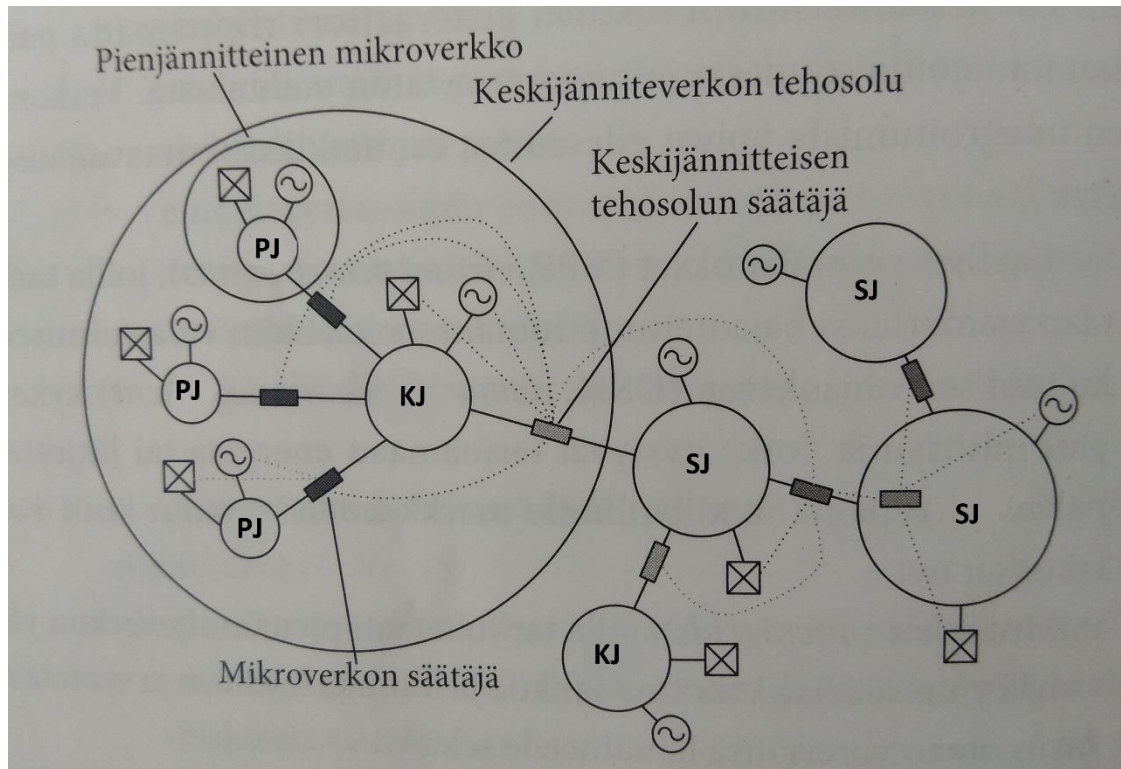
5 Mikroverkot

Haja-asutusalueiden säävarma sähkönjakelu on kallista ja hankalasti toteutettavissa Suomessa. Sähkönsaanti voi tällaisilla alueilla olla kuitenkin erittäin tärkeää jo pelkästään elinkeinon turvaamiseksi. Haja-asutusalueiden asukkaat ja erityisesti eläintilalliset ovat tiedostaneet tämän. Suurimmalta osalta löytyy varavirtaa sekä uusiutuvan energian lähteitä pitkien sähkönjakeluhäiriöiden varalle. Mikroverkot voivat olla tulevaisuuden ratkaisu niin haja-asutusalueilla kuin kaupungeissa. [20.]

Mikroverkot ovat itsenäiseen saarekekäyttöön kykeneviä pieniä verkkoja, joissa kuluttajat tuottavat oman energiansa. Mikroverkon sähkön tuottavat kuluttajien omat laitteistot, esimerkiksi aurinkopaneelit ja tuulivoimalat. Kuluttajat pystyvät kattamaan oman kulutuksensa, lisäksi myymään tai varastoimaan ylijäämäenergiaa. Olennaisina osina mikroverkkoja tulevat olemaan uusiutuvan energian lähteiden lisäksi erilaiset energiavarastot, jollaisina voivat toimia jatkuvasti kehittyvät ja lisääntyvät sähköautot. [20.]

Maakaapeloinnin rakentaminen erityisesti haja-asutusalueilla voi olla verkkoyhtiölle kallista. Harvaan asutut seudut vaativat pitkiä kaapelointeja. Myös paikoittelun haastavat kaivuolosuhteet nostavat maakaapeloinnin hintaa. Maakaapeloinnin rinnalle tai korvaajaksi tulevaisuudessa on suunniteltu mikroverkkoja. Maa-seudun tilalliset voisivat tuottaa oman lämpö- ja sähköenergiansa pienillä CHP-laitoksilla ja olla muiden yhteisön jäsenten kanssa varmistamassa näin häiriöttömän sähkönsaannin. Mikroverkot olisivat yhdistettynä valtakunnan verkkoon, eivätkä siis tarvitsisi jatkuvasti tuottaa oman kulutuksensa verran sähköä. Sähkönjakeluhäiriöiden aikana ne kuitenkin kykenisivät selviytymään itsenäisesti varastoillaan sekä jatkuvalla tuotollaan. [20.]

Kuvassa 6 on esitetty eräänlainen mikroverkkoratkaisu, jossa useat pienet PJ-solut yhdistyvät yhdeksi suuremmaksi KJ-tehosoluksi. Se toimii näin täysin itsenäisenä keskijännitesolmuna. KJ-tehosolu on yhteydessä keski- ja suurjänniteverkkoihin, joista taas haarautuu omia pienempiä säteittäisiä haaroja perinteiselle verkolle. [20.]



Kuva 6. Mikroverkko, jossa PJ-mikroverkkosolut yhdistyvät KJ-tehosoluun. [15,510.]

Mikroverkkojen suunnittelussa on Suomen oloissa otettava huomioon, että ne tuottavat riittävästi energiaa läpi vuoden. Alimitoitettuna mikroverkko ei kykene enää toimimaan itsenäisesti, eikä siis varsinaisesti voida puhua enää mikroverkosta. Tekniikan ja palveluiden yleistyessä mikroverkot hyötyvät siitä, mitä useampi käyttäjä niihin liittyy. Usealla hajautetulla tuotannolla ja varastolla voidaan varmistaa mikroverkon toimivuus häiriötilanteissa. [20.]

Mikroverkkojen rakentaminen yleistyy tulevaisuudessa, kun tarvittavat komponentit yleistyvät ja samalla halpenevat. Lisäksi on odotettava vielä Euroopan

Unionissa valmisteilla olevan sähkömarkkinadirektiivin lopullista toimeentulemistä. Uusi direktiivi mahdollistaa verkkoyhtiöille muun muassa sähkönvarastoinnin sekä ohjaa niitä tutkimaan muita kustannustehokkaita toimia, kuten hajautettua tuottoa. Direktiivin vaikutus näkyy Suomessa aikaisintaan vuonna 2021. Nähtäväksi jää, päivitetäänkö regulaatiomallia kesken valvontakauden vai vasta vuonna 2024, jolloin sen tarkastus tehdään. [21.]

Mikroverkkojen rakentaminen voisi olla kustannustehokas vaihtoehto maakaapeloinnille. Verkkoyhtiön omistamassa tai tukemassa mikroverkossa voitaisiin hyödyntää asiakkaiden jo nykyisiä laitteita ja varastoja, mikä pienentäisi kustannuksia. Asiakkaalle taattaisiin näin myös varmempi sähkönjakelu. Mikroverkot ja niiden hajautettu tuotto voisi toimia myös jakeluverkon tehoreservinä ja syöttää häiriötilanteissa muitakin haaroja. [20.]

6 LVDC ja HVDC-verkot

Tasasähköverkkoa käytetään tällä hetkellä erityisen pitkien matkojen välillä siirtoverkkona, kuten meren alituksissa. Tällainen yhteys on esimerkiksi Suomen ja Viron välillä. Vaihtosähköjärjestelmällä ei voida toteuttaa pitkien välien siirtoa, koska kaapelin ollessa tarpeeksi pitkä, vie varausvirta koko kaapelin siirtokapasiteetin. Lisäksi tarvittaisiin hajautettua kompensointilaitteistoa. Tasasähköä käytettäessä tätä ongelmaa ei ole, sillä verkon tehon siirrettävyyden määrää jännitteen suuruus, eli myös kaapelien ja laitteiston mitoitus. [22, 297.]

Tasasähköverkolla saavutetaan etuja perinteiseen vaihtosähköverkkoon nähden. Nykyiset maakaapeloinnit vaativat hajautettua kompensointia. Maakaapelointi lisää verkon resistiivistä vikavirtaa, mikä aiheuttaa jännitehäviöitä. Lisäksi maakaapelointi luo verkkoon loistehoa, joka nostaa jännitettä jos kuormitusta ei ole tarpeeksi. Toisin sanoen maakaapelointia ei voida rakentaa pitkiä matkoja ilman kompensointia, joten joudutaan käyttämään hajautettua kompensointia. Kompensointilaitteisto sijoitetaan usein puistomuuntamoiden yhteyteen. Kapasiitivista maasulkuvirtaa voidaan kompensoida Shunt-reaktoreilla keskitetysti. Kompensointilaitteisto nostaa kuitenkin jo ennestään kaapeloinnin suuria kustannuksia. [23.]

6.1 Pienjännitteinen tasasähkö LVDC

Tasasähkön käyttö on lisääntynyt kotitalouksissa aurinkopaneelien ja pienten tuulivoimaloiden takia. Järjestelmät muuttavat aurinkopaneelien tuottaman sähkön vaihtosähköksi vaihtosuuntaajassa, jolloin sitä voidaan käyttää normaalissa vaihtosähköjärjestelmässä. Vaihtoehtoisesti sähkö voidaan myydä verkkoyhtiölle tai varastoida akustoon.

Tulevaisuudessa uusiutuvan energian pientuotannon lisääntyessä tarvitaan järjestelmä, johon voidaan liittyä suoraan ja helposti. Tämä tukee tasasähköverkon

kehitystä ja mahdollista käyttöönottoa integroituna nykyiseen vaihtosähköjärjestelmään. Tasasähköverkko tarvitsee loistehoa toimiakseen, joten sen avulla voidaan kompensoida vaihtosähköverkon osia ja varmistaa siirtokapasiteetti. Älyverkot muodostavat erilliseen saarekekäyttöön kykeneviä mikroverkkoja, joiden sähköjärjestelmänä voisi toimia LVDC-verkot. [24.]

Tasasähköverkolla toteutettu mikroverkko toimii molempiin suuntiin kunhan vaihto- ja tasasuuntauslaitteisto on asennettu. Näin oman energian tuottavaa mikroverkkoa voidaan hyödyntää myös vaihtosähköverkossa, jos tarvitaan lisäkapasiteettia kovimman kulutuksen aikaan. Mikroverkko yhdistää useita toisistaan erillään olevia energiantuottoyksiköitä yhdeksi kokonaisuudeksi. [25;26.]

Nykyisen järjestelmän rinnalle tuotuja tasasähköyhteyksiä voitaisiin käyttää vaihto- ja tasasuuntaajien avulla hyvin hyödyksi, eikä näin ollen kuluttajien tarvitsisi tehdä muutoksia omissa sähköjärjestelmissään. Tasasähköverkko jakeluverkon osana voisi tulevaisuudessa olla hyvin mahdollinen. Sillä voitaisiin johtaa suoraan tuulipuistojen ja aurinkopaneeleiden tuottama sähkö kuluttajalle. Uudisrakennuksissa tämä voitaisiin huomioida yhdistettynä vaihto- ja tasasähköjärjestelmänä, esimerkiksi nykyelektroniikka käyttää pitkälti DC-jännitettä. Myös LED-valaistus ja ilmanvaihtolaitteistoja voitaisiin toteuttaa suoraan DC-syötöillä. [25;26.]

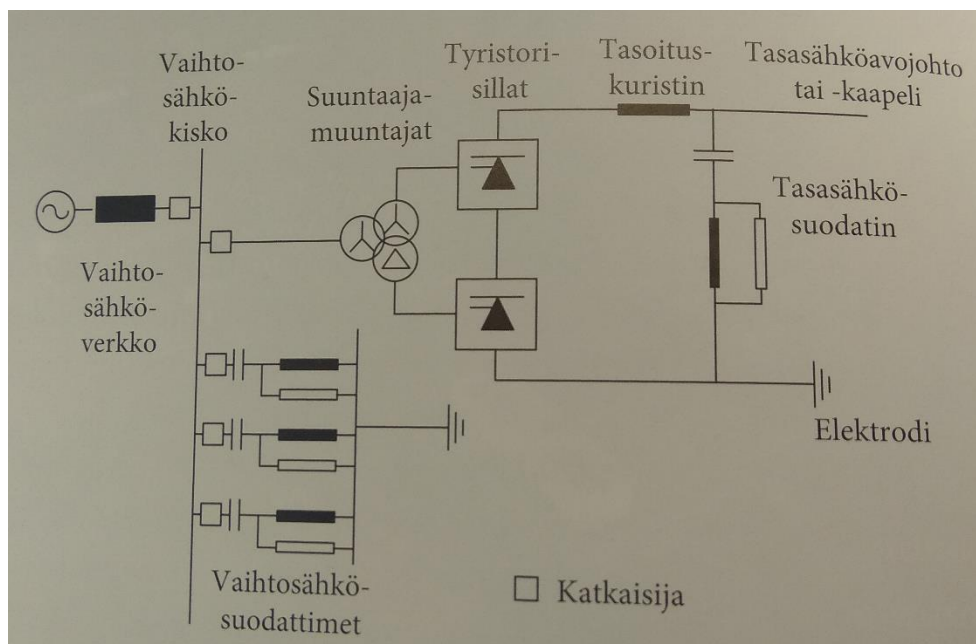
6.2 Suurjännitteiset tasavirtayhteydet (HVDC-yhteydet)

Korkeajännitteisillä tasasähköyhteyksillä on toteutettu Pohjoismaiden välisiä yhteyksiä sekä yhteydet Eurooppaan. Pitkät merikaapelit sekä ilmajohtot toimivat joko kahden eri synkronissa olevan verkon yhdistämiseen tai ne voivat myös toimia nykyisen verkon sisällä siirtojohtoina. Tasasähkön käyttäminen jakeluverkon kaltaisena silmukoituna verkkona on teknisesti vaikeampaa kuin vaihtovirralla toteutetun. Uusien johtolähtöjen ja haarojen rakentaminen verkkoon on vaikeaa ja kallista. Lisäksi tarvittaisiin luotettavia suuria tehoja kestäviä katkaisijoita. [22,308–324.]

Suurjännitteiset tasasähköyhteydet tarvitsevat molempiin päihin suuntaaja-aset, jotka ovat vastaavia vaihtosähköasemia kalliimpia. Suuntaaja-asetilla tapahtuu vaihto- ja tasasuuntaukset sekä niiden jälkeen yhdistyminen vaihtosähköverkkoon. Suuntaaja-asetat ovat monimutkaisempia kuin perinteiset vaihtosähköasemat, sillä niissä tarvitaan paljon tehoelektroniikkaa ja suuntaajamuuntajia. Tasasähköverkon suurimmat häviöt tapahtuvat tasasuuntausasemilla, mikä johtuu puolijohdekomponenttien käytöstä. [22,308–324.]

6.2.1 Verkkokommutoitu tasasähköyhteys

Tasasähköyhteyksiä voidaan toteuttaa hieman eri tavoin. Verkkokommutoidussa verkossa (kuvassa 7) käytetään virtalähdesuuntaajaa. Verkko vaatii paljon loistehoa toimiakseen, sillä tyristorisillat kuluttavat sitä. Kulutettu loisteho kompensoidaan useiden kompensointikondensaattoreiden avulla, joita kytketään tarvittaessa päälle ja pois. [22,308–324.]



Kuva 7. Verkkokommutoidun yhteyden suuntaaja-asema. [22,308.]

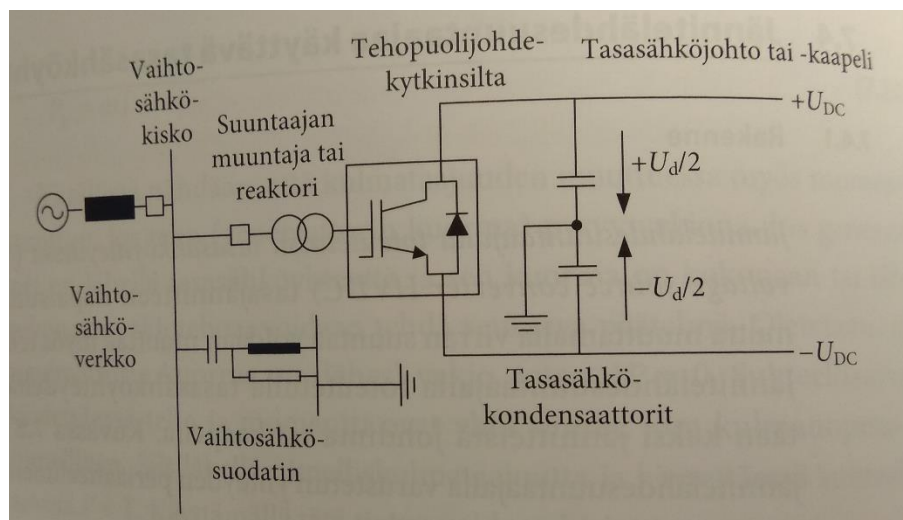
Tasajännitteen suuruus ja napaisuus voidaan säätää tyristorisilloilla. Jos johtimena käytetään eristettyä johdinta, on eristeen oltava esimerkiksi öljypaperia.

Muovieriste ei kestä jännitteen napaisuuden vaihtoa vaan polarisoituu. Virran säätäminen taas onnistuu johdon päiden välisellä jännite-erolla. Erilaisilla kuristimilla ja suodattimilla tasoitetaan tyristorisiltojen tuottamaa pulssista jännitettä sekä yliaaltoja. [22,308–324.]

6.2.2 Itsekommutoitava tasasähköyhteys

Jännitelähdesuuntaajalla toteutetussa itsekommutoituvassa verkossa voidaan säätää pätö- ja loistehoa toisistaan irrallaan. Asemahäviöt ovat kuitenkin suuremmat kuin verkkokommutoidussa verkossa. Erona verkkokommutoituun järjestelmään jännitteen napaisuutta ei vaihdeta, vaan virran suuntaa vaihtamalla saadaan vaihdettua myös tehon suunta. Järjestelmään tarvitaan myös vähintään kaksi johdinta, koska jännitteen napaisuutta ei vaihdeta ja virta voi kulkea molempiin suuntiin. Paluujohdina ei voida siis käyttää anodin ja katodin välistä merta tai maata. [22,325–329.]

Tyristorisiltojen sijaan suuntaaja-asemalla käytetään tehopuolijohdekytkinsilta. Tehopuolijohdekytkinsillan avulla kondensaattoreihin saadaan tietty jännitetaso tasasähköä ja myös muodostettua vaihtosuuntauspäässä vaihtojännitettä pulssinleveysmodulointia käyttäen (kuvassa 7).



Kuva 7. Itsekommutoituvan verkon suuntaaja-asema 2-tasoisena. [22, 325.]

Puolijohdekomponenttien osalta on olennaista, että niitä voidaan sulkea ja avata riippumatta vaihtojännitteestä. Koska suuntaaja on itsekommutoiva, voidaan sillä syöttää tarpeen vaatiessa jännitteetöntäkin verkkoa.

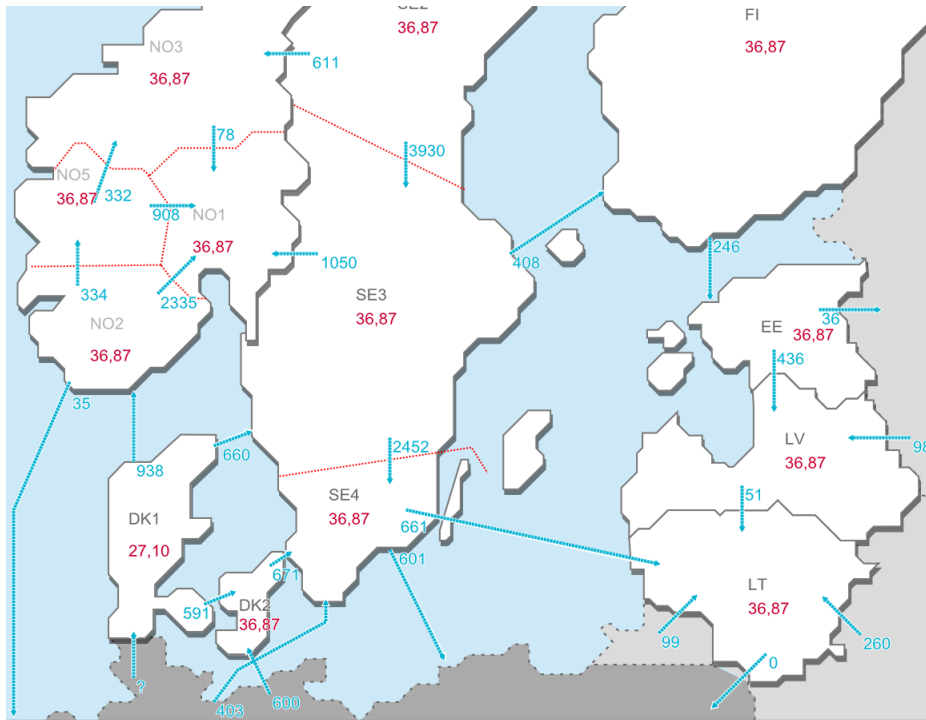
2-tasoisella pulssinleveysmoduloinnilla muutettu vaihtojännite on kanttiaaltoa. Lähemmäksi siniaaltoa päästään käyttämällä monitasotekniikkaa, jolla saadaan muodostettua portaittaista siniaaltoa. Suuntaajan rakenne on kuitenkin monimutkaisempi. Toisaalta se tuottaa myös vähemmän yliaaltoja, koska aaltomuoto on lähempänä siniä. [22,325–329.]

7 EU-superverkko

Euroopan Unionin superverkko on verkkovisio, jonka tarkoituksena on luoda Eurooppaan yhteinen kantaverkkojärjestelmä. Järjestelmää on suunniteltu toteutettavaksi jopa pelkillä tasavirtayhteyksillä. Pitkiä maiden välisiä tasasähköyhteyksiä on jo rakennettu useita ympäri maailmaa. Yksi maailman pisimmistä merikaapeleista on vuosien 2006–2008 aikana rakennettu Norjan ja Alankomaiden välinen NorNed-kaapeli. [27;28.]

Euroopan Unionin verkkovision tarkoituksena olisi yhdistää Pohjoismaiden, erityisesti Norjan ja Ruotsin mittavat vesivoimalat, Pohjanmeren tuulipuistot ja Saharan aurinkovoimalat. Lähtökohtaisesti uuden EU:n kantaverkon visio on saanut alkunsa kuten aikaisemminkin käsitellyt älyverkot. Uusiutuvan energian tuotanto kasvaa ja verkon tehon säätömahdollisuudet pienenevät. Lisäksi uusiutuvan energian lähteet ovat usein kaukana kaupungeista. Useimmat hajautetut tuotannot tuottavat suoraan tasasähköä ja niiden liittäminen nykyiseen vaihtosähköjärjestelmään voi olla hankalaa. Euroopan Unionin energiapolitiikka ajaa aktiivisesti uusiutuvan energiantuotannon lisäämiseen ja kasvihuonepäästöjen leikkaamiseen, mikä pakottaa jäsenmaita jatkuvasti kehittämään ja pohtimaan vaihtoehtoja nykyisille järjestelmille. [27;28.]

Pohjoismaat ja myös Saksan yhdistävät tasasähköyhteydet (kuva 8) ovat olleet jo pitkään käytössä ja ne ovat laajentaneet sähkömarkkinoita paljon. Yhteyksien luominen muihin maihin on yksi tekijä Suomen edulliseen sähkönhintaan. Norjan ja Ruotsin tarjoama edullinen vesivoima on tärkeä säätövara Suomelle.



Kuva 7. Pohjoismaiden, Baltian maiden ja Euroopan välisiä siirtoja. Punaisella hinta €/MWh ja sinisellä siirrettävä määrä MW sekä siirron suunta. [32.]

Tukkumarkkinoista Pohjoismaissa ja Baltian maissa vastaa Nord Pool. Se on pohjoismaalaisten ja baltialaisten kantaverkkoyhtiöiden omistama. Yhteydet eri maiden välillä luovat nykyisellään pullonkaulakohtia, mikä muodostaa hinta-alueita. Hinta-alueen muodostamiseen vaikuttaa myös maan oman kantaverkon vahvuus eli siirtokapasiteetti. [30;31.]

EU:n yhteisellä kantaverkolla voitaisiin hyödyntää lukuisten eri tuotantolähteiden parhaita puolia. Näin saataisiin maksimoitua uusiutuvan energian käyttö kaikissa jäsenmaissa. Laajat sähkömarkkinat jäsenmaiden välillä luo myös pullonkaulakohtia verkkoon, sillä halvinta sähköä siirretään aina kalliimmalle tuotannon alueelle. Tämä voi mahdollisesti vaikuttaa alueellisesti tuotannon kannattavuuteen. Yhteinen kantaverkkovisio on usean vuosikymmenen pituinen projekti. Tällä hetkellä Pohjoismaiden välille on rakennettu hyvin toimiva järjestelmä, joka hyödyttää sen osapuolia. Seuraava askel visiossa olisi vahvistaa yhteyksiä Pohjoismaiden ja Euroopan välillä. Niin voitaisiin luoda ensiaskeleet entistä laajemmalle ja siirtokapasiteetiltään suuremmalle verkolle.

8 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli perehtyä Suomen sähköverkon nykyiseen tilaan ja siinä tapahtuviin muutoksiin 2010-luvulla sekä tulevaisuudessa. Tällä hetkellä sähkömarkkinalaki ohjaa verkkoyhtiöitä parantamaan jakeluvarmuutta, joka toteutetaan pääosin maakaapeloinnilla. Sähköverkkoyhtiöt joutuvat investoimaan vuosittain merkittäviä summia verkon saneeraukseen täyttääkseen annetut kriteerit. Verkkoyhtiöiden olisi kuitenkin hyvä miettiä jo korvaavia tekniikoita nykyisten rinnalle, kuten mikroverkkoja. Valitettavasti Suomen laki ja direktiivit eivät tällä hetkellä edes anna mahdollisuuksia siihen. EU:ssa käsittelyssä oleva direktiivimuutos vapauttaa onneksi verkkoyhtiöiden mahdollisuuksia toteuttaa verkon saneerausta eri tavoin. Tällä hetkellä olisi kuitenkin hyvä kerätä kokemuksia erilaisista ratkaisumalleista ja kokeilla niitä jo käytännössä.

Sähköverkkojen kehitykseen ja muutokseen vaikuttaa kaksi isoa tekijää, yleisellä tasolla tehoelektroniikan ja automaatiolaitteiden jatkuva kehitys. Komponenttien kehitys on nopeaa ja ne paranevat jatkuvasti, näin automaation lisääminen verkkoon on entistä halvempaa. Toisena merkittävänä tekijänä voinee pitää ilmastonmuutosta. Sään ääri-ilmiöiden lisääntyessä, verkon kaapelointiaste ja automaatiikka ilmajohdoissa kasvaa. Myös Euroopan Unionin vaatimukset uusiutuvan energian lisäämisestä tulevaisuudessa, pakottaa kehittämään ja harkitsemaan uusia vaihtoehtoja niin sähköverkostossa kuin markkinoilla.

Opinnäytetyön ja työntekoni aikana olen mielestäni saanut hyvän kuvan siitä, mitä sähköverkkojen osalta tällä hetkellä tapahtuu. Selvää on myös, mitkä tekijät vaikuttavat verkon kehitykseen ja miten se tulee jatkossa kehittymään. Maakaapeloinnilla ja automaation lisäämisellä verkkoon pystytään selvästi parantamaan jakeluvarmuutta. Verkon saneeraus ja uuden rakentaminen ovat pitkän aikavälin investointeja, joten jo nyt olisi syytä ottaa huomioon automaation lisääntyminen ja kehittyminen. Verkko ja sen komponentit olisivat mahdollisuuksien mukaan rakennettava riittävän modulaarisiksi.

Älyverkkojen ja sen eri osien tulevaisuudesta on vaikea sanoa vielä mitään varmaa, työssä on kuitenkin perehdytty yleisiin ja myös jo muissa maissa toteutettuihin malleihin. Selvää on, että automaation merkitys tulee korostumaan entisestään, niin verkon kuin kuluttajienkin käytössä. Jo nyt automaatio on huomaamatta arkipäiväisessä elämässä käytössä erilaisin etä- ja älyohjauksin. Älyverkkojen erilaisten sovellusten käyttöönoton tulee Suomessa määräämään jakeluverkkoyhtiöt. Tällä hetkellä verkkoyhtiöille on kovat paineet toteuttaa säävarmaa verkkoa ja se vaatii suuria investointeja. Lähivuosien aikana verkkoyhtiöillä tuskin on intressejä sijoittaa uusiin ja vähän testattuihin tekniikoihin. Erilaisia äly- ja mikroverkon pilottihankkeita on jo toteutettu yhteistyössä, mikä antaa varmasti hyvää pohjatietoa tulevaisuutta ajatellen.

Työn jatkokehittäminen ilman varsinaisia fyysisiä kohteita voi olla haastavaa, mutta älyverkon eri osiin voisi perehtyä yksityiskohtaisemmin esimerkiksi komponenttitasolla. Jo olemassa olevia pientuotantolaitteita voisi käyttää simulointitaroituksessa. Niin voisi selvittää esimerkiksi mikroverkkojen rakenne- ja tuotantomahdollisuuksia. Myös erilaisten pilottihankkeiden kerättyä dataa voisi hyödyntää sekä soveltaa eri osiin.

Lähteet

1. Caruna Oy. Älykäs sähköverkko. 2017. <https://www.caruna.fi/tietoa-ja-ohjeita/sahkoverkko/alykas-sahkoverkko> (8.11.2017)
2. Insplan Oy. Palvelut. 2017. <http://insplan.fi/palvelut/> (8.11.2017)
3. Energiateollisuus ry. Sähköverkot. 2017. https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot (8.11.2017)
4. Fingrid Oyj. Voimansiirtoverkko. 2017. <http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esitely/voimansiirtoverkko/default.aspx/Sivut/> (8.11.2017)
5. PKS Oy. Sähkömarkkinalaki. 2017. <https://www.pks.fi/sahkomarkkinalaki> (13.11.2017)
6. Sopanen, Jukka. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu ja Motiva Oy. Energian Siirto. 2003. http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/energia-verkko/energian_siirto/sahkonsiirto.htm (22.11.2017)
7. Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto 2009. ISBN 978-951-672-359-7
8. KL Industri Ab. Tuotteet. 2017. https://klindustri.se/fi/tuotteet/peltirakenteiset-puisto_muuntamot-ja-erotinasemat-elit/ (11.12.2017)
9. Helen Oy. Uutiset. 2014. <https://www.helen.fi/uutiset/2014/verkostoauto-maatio-nopeuttaa-sahkoverkon-vianselvitysta/> (22.1.2018)
10. Kärkkäinen Seppo, Koponen Pekka, Martikainen Antti & Pihala Hannu. VTT tutkimusraportti ”sähkön pienkuluttajien etäluettavan mittaroinnin tila ja luomat mahdollisuudet”. 2006. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/VTT-R-09048-06.pdf> (22.1.2018)
11. Alanen Raili & Hätönen Hannu. VTT selvitys ”sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta”. 2006. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf> (10.2.2018)
12. Energiateollisuus ry. Kysyntäjousto. 2018. https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kysyntajousto (10.2.2018)
13. Työ- ja elinkeinoministeriö. Älyverkot. 2018. <http://tem.fi/perustietoja> (10.2.2018)
14. 3M Oy. Älyverkko ja koti. 2018. http://solutions.3msuomi.fi/wps/portal/3M/fi_FI/SmartGrid/EU-Smart-Grid/ (10.2.2018)
15. Elovaara Jarmo & Haarla Liisa. Sähköverkot II. Helsinki. Otatieto 2011. ISBN 978-951-672-363-4
16. Kumpulainen Lauri, Laaksonen Hannu, Komulainen Risto, Martikainen Antti, Lehtonen Matti, Heine Pirjo, Silvast Antti, Imris Peter, Partanen Jarmo, Lassila Jukka, Kaipia Tero, Viljainen Satu, Verho Pekka, Järventausta Pertti, Kivikko Kimmo, Kauhaniemi Kimmo, Lågland Henry & Saaristo Hannu. VTT tiedote ”Verkkovisio 2030”. 2006. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2361.pdf> (10.2.2018)
17. Energiateollisuus ry. Perustietoa energialasta. 2018. https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kysyntajousto (1.3.2018)

18. Fingrid Oyj. Kulutus ja tuotanto kuvaaja. 2018. [https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/\(1.3.2018\)](https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/(1.3.2018))
19. Energiateollisuus ry. Säättövoima. 2018. [https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saattovoima\(1.3.2018\)](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saattovoima(1.3.2018))
20. Uski Sanna, Alto Pami, Forssen Kim, Holttinen Hannele, Kojo Matti, Repo Sami, Rosqvist Tony, Sarsama Janne & Talus Kim. EL-TRAN. Analyysi 3/2018 "Mikroverkkojen mahdollisuuksista sähkön toimituksen luotettavuuden parantajana". 2018. [https://el-tran.fi/analyysit/\(1.3.2018\)](https://el-tran.fi/analyysit/(1.3.2018))
21. Niemelä Esa. "Sähköverkkojen kehitys ja tulevaisuus". Energiaverkkojen asiantuntija. Energiateollisuus ry. Haastattelu Simo Purho 6.3.2018.
22. Elovaara Jarmo & Haarla Liisa. Sähköverkot I. Helsinki. Otatieto 2011. ISBN 978-951-672-360-3
23. Maviko Oy. Tuotteet. 2018. [https://www.maviko.fi/tuotteet/hajautettukompensointi/\(12.2.2018\)](https://www.maviko.fi/tuotteet/hajautettukompensointi/(12.2.2018))
24. Ensto Oy. LVDC-Älyverkot. 2018. [https://www.ensto.com/fi/toimialat/verkonrakennus/lvdc-alyverkko/\(12.2.2018\)](https://www.ensto.com/fi/toimialat/verkonrakennus/lvdc-alyverkko/(12.2.2018))
25. Ensto Oy. Artikkelit LVDC-artikkeli osa 2. 2017. [https://www.ensto.com/fi/yhtio/uutiset-ja-media/artikkelit/lvdc-artikkeli-osa-2/\(12.2.2018\)](https://www.ensto.com/fi/yhtio/uutiset-ja-media/artikkelit/lvdc-artikkeli-osa-2/(12.2.2018))
26. Alanen Raili & Kylkisalo Toni. VTT julkaisu "tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa". 2007. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2007/W78.pdf> (12.2.2018)
27. Laatikainen Tuula. Eurooppa-sähkö on pian täällä. Tekniikka ja talous 2007. <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/2007-10-30/Eurooppa-s%C3%A4hk%C3%B6-on-pian-t%C3%A4%C3%A4ll%C3%A4-3267817.html>(12.3.2018)
28. Suvanto Pertti. Euroopan kantaverkko tarvitsee tasavirtaa. ABB Oy. 2010. <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/a20a34ebb94c6922c12576b6002e083e.aspx>(12.3.2018)
29. Euroopan Unioni. EU aiheittain. 2018. https://europa.eu/european-union/topics/energy_fi(12.3.2018)
30. Energiateollisuus ry. Tukku markkinat 2018. [https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/tukkumarkkinat\(12.3.2018\)](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/tukkumarkkinat(12.3.2018))
31. Energiateollisuus ry. Sähköpörssin ammattisanasto. 2018. https://energia.fi/files/1149/Sahkoporssin_ammattisanasto.pdf (12.3.2018)
32. Statnett. Nordic power flow. 2018. <http://www.statnett.no/en/Market-and-operations/Data-from-the-power-system/Nordic-power-flow/> (12.3.2018)